

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-146543

(43)Date of publication of application : 26.05.2000

(51)Int.Cl.

G01B 11/24
G06T 7/00

(21)Application number : 10-326288

(71)Applicant : NEC CORP

(22)Date of filing : 17.11.1998

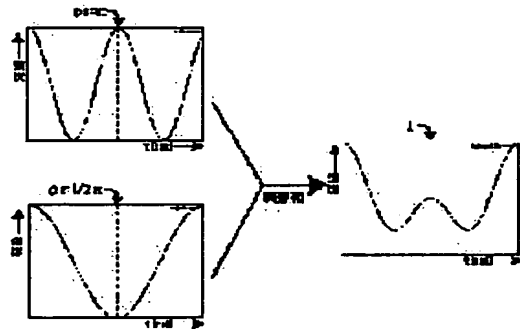
(72)Inventor : ISHIYAMA RUI

(54) THREE DIMENSIONAL SHAPE MEASURING DEVICE, METHOD AND RECORD MEDIUM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To measure three-dimensional shape with a short time and surely connect phases.

SOLUTION: A light pattern emitting to a measuring object has a strength change expressed with a signal 103 that is added a sine signal 102 with double cycle 2π of a sine signal 101 to the sine signal 101 with a basic cycle π . An image of the measuring object projected by this light pattern is shot with a camera and a phase ϕ_1 corresponding to the sine signal with the basic cycle and a phase ϕ_2 corresponding to the sine signal with the double cycle are calculated based on this image shot. Then, after firstly connecting the phase ϕ_2 , the phase ϕ_1 is connected by reference to this connection. Based on the phase ϕ_1 connected and position relation between the camera and a light source emitting the light pattern, depth to a surface of the measuring object is calculated.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 17.11.1998

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3199041

[Date of registration] 15.06.2001

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right] 15.06.2004

BEST AVAILABLE COPY

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

Cited Reference

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-146543

(P2000-146543A)

(43) 公開日 平成12年5月26日 (2000.5.26)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード(参考)
G 0 1 B 11/24		G 0 1 B 11/24	E 2 F 0 6 5
			K 5 B 0 5 7
G 0 6 T 7/00		G 0 6 F 15/62	4 1 5

審査請求 有 請求項の数10 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願平10-326288

(22) 出願日 平成10年11月17日 (1998. 11. 17)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 石山 晃

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株

式会社内

(74) 代理人 100104916

弁理士 古溝 聡 (外1名)

Fターム(参考) 2F065 AA25 AA54 BB05 DD06 FF07

FF23 GG01 GG15 GG18 HH01

JJ03 JJ26 KK02 LL41 MM11

PP02 QQ21 QQ23 QQ32 UU01

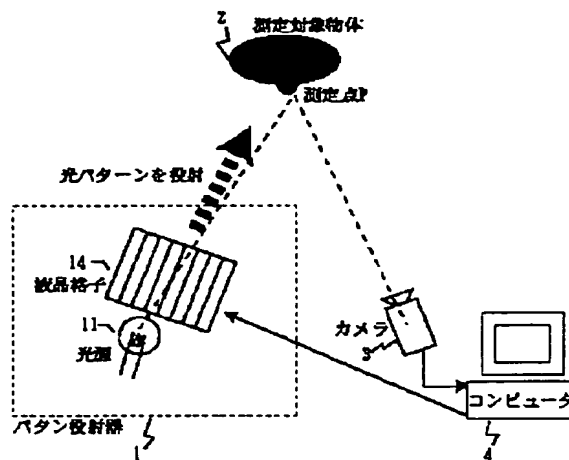
5B057 BA15 DA07 DB03 DC09

(54) 【発明の名称】 3次元形状測定装置、方法及び記録媒体

(57) 【要約】

【課題】 3次元形状の測定を短い時間で行い、位相の接続を確実に行う。

【解決手段】 計測対象物体に投射する光パターンは、基本の周期 π の正弦波信号101にその2倍の周期 2π の正弦波信号102を加えた信号103で表される強度変化を有するものとする。このような光パターンが投射された計測対象物体を画像をカメラで撮影し、この撮影した画像に基づいて、基本の周期の正弦波信号に対応する位相 ϕ_1 と2倍の周期の正弦波信号に対応する位相 ϕ_2 とが計算される。そして、位相 ϕ_2 の接続を最初に行った後、これを参照して位相 ϕ_1 の接続を行う。そして、この接続した位相 ϕ_1 と、カメラ及び前記光パターンを照射した光源の位置関係とに基づいて、計測対象物体の表面までの奥行きを計算する。



BEST AVAILABLE COPY

【特許請求の範囲】

【請求項1】複数の正弦波を足し合わせた信号で、前記複数の正弦波がそれぞれ最も周期の短い正弦波の整数倍の周期を有する信号によって表される強度変化を有する光パターンを計測対象物に投射する光投射手段と、前記光投射手段からの光パターンが投射された計測対象物の画像を撮影する画像撮影手段と、前記画像撮影手段によって撮影された画像に基づいて、前記複数の正弦波のそれぞれの位相を計算する位相計算手段と、前記位相計算手段によって計算された各位相を、対応する正弦波の周期の長いものから順番により周期が長い正弦波の位相を参照しながら、接続していく位相接続手段と、

前記位相接続手段によって接続された位相と、前記光投射手段及び前記画像撮影手段との位置関係と、前記画像撮影手段によって撮影された画像中の各画素の位置とに基づいて、前記計測対象物の形状を求める形状算出手段とを備えることを特徴とする3次元形状測定装置。

【請求項2】前記光投射手段は、所定の輝度の光を発生する光源と、前記複数の正弦波を重ね合わせた信号によって表される強度変化に対応する濃淡パターンを有する位相格子と、前記位相格子を駆動する駆動手段とを備え、前記駆動手段によって駆動される位相格子を介して前記光源からの光を前記計測対象物に投射することを特徴とする請求項1に記載の3次元形状測定装置。

【請求項3】前記光投射手段は、所定の輝度の光を発生する光源と、前記複数の正弦波を重ね合わせた信号によって表される強度変化に対応して光の透過率を変化させる光透過手段とを備え、前記光透過手段を介して前記光源からの光を前記計測対象物に投射することを特徴とする請求項1に記載の3次元形状測定装置。

【請求項4】前記光投射手段は、前記複数の正弦波を重ね合わせた信号によって表される強度変化で発光する発光素子を備え、前記発光素子が発した光を前記計測対象物に投射することを特徴とする請求項1に記載の3次元形状測定装置。

【請求項5】前記光投射手段が投射する光パターンを構成する正弦波 ψ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は、数式1によって表され、

【数1】

$$\psi_i = A_i \left(1 + \cos \left(\frac{1}{k_i} t \right) \right)$$

(但し、 i は正弦波信号の番号であり1から n までをとり、周期の短い順に番号をつけて1が基本の周期で n が最長の周期の正弦波とする。 k_i は1または正の整数で $k_1 = 1 < k_2 < \dots < k_n$ であり、 A_i はそれぞれの周期における光強度である。) 前記計測対象物上の点Pにおける光強度 $E_P(t)$ は、数式2によって表され、

【数2】

$$E_P(t) = \sum_{i=1}^n A_i \left(1 + \cos \left(\frac{1}{k_i} t + \phi_i \right) \right)$$

(但し、 ϕ_i は光源から点Pへの見込み角に応じて定まる、 $t = 0$ 時点での各周期の正弦波毎の位相である。) 前記画像取込手段によって前記画像撮影手段から取り込んだ画像の前記点Pに対応する画素の輝度 $I_P(t)$ は、数式3によって表される

10 【数3】

$$I_P(t) = I_P^{\text{bias}} + \sum_{i=1}^n A_i' \cos \left(\frac{1}{k_i} t + \phi_i \right)$$

(但し、 I_P^{bias} は輝度のバイアス項、 A_i' は各周期における輝度の振幅である。)

ことを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載の3次元形状測定装置。

【請求項6】前記位相計算手段は、前記光パターンを構成する正弦波 ψ_i の位相 ϕ_i を、数式4によって計算する

【数4】

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{-\sum_{j=1}^m I_P(t_j) \sin \frac{1}{k_i} t_j}{\sum_{j=1}^m I_P(t_j) \cos \frac{1}{k_i} t_j}$$

ただし、 $t_j = \frac{j-1}{m} k \cdot \pi$

ことを特徴とする請求項5に記載の3次元形状測定装置。

【請求項7】前記位相接続手段は、画像全体で隣接する画素間の位相が滑らかになるように 2π ラジアン整数倍を足し引きして、各位相を接続していくことを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項に記載の3次元形状測定装置。

【請求項8】互いに直交する複数の周期関数を足し合わせた信号で表される強度変化を有する光パターンを計測対象物に投射する光投射手段と、

前記光投射手段からの光パターンが投射された計測対象物の画像を撮影する画像撮影手段と、

前記画像撮影手段によって撮影された画像に基づいて、

40 前記複数の周期関数のそれぞれの位相を計算する位相計算手段と、

前記位相計算手段によって計算された各位相を、対応する周期関数の周期の長いものから順番により周期が長い周期関数の位相を参照しながら、接続していく位相接続手段と、

前記位相接続手段によって接続された位相と、前記光投射手段及び前記画像撮影手段との位置関係と、前記画像撮影手段によって撮影された画像中の各画素の位置とに基づいて、前記計測対象物の形状を求める形状算出手段とを備えることを特徴とする3次元形状測定装置。

【請求項9】複数の正弦波を足し合わせた信号で、前記複数の正弦波がそれぞれ最も周期の短い正弦波の整数倍の周期を有する信号によって表される強度変化を有する光パターンを計測対象物に投射する光投射ステップと、前記光投射ステップで光パターンが投射された計測対象物の画像を撮影する画像撮影ステップと、前記画像撮影ステップにおいて撮影された画像に基づいて、前記複数の正弦波のそれぞれの位相を計算する位相計算ステップと、前記位相計算ステップで計算された各位相を、対応する正弦波の周期の長いものから順番により周期が長い正弦波の位相を参照しながら、接続していく位相接続ステップと、前記位相接続ステップで接続された位相と、前記光投射ステップで投射する光の発生位置及び前記画像撮影ステップでの撮影位置の位置関係と、前記画像撮影ステップで撮影された画像中の各画素の位置とに基づいて、前記計測対象物の形状を求める形状算出ステップとを含むことを特徴とする3次元形状測定方法。

【請求項10】複数の正弦波を足し合わせた信号で、前記複数の正弦波がそれぞれ最も周期の短い正弦波の整数倍の周期を有する信号によって表される強度変化を有する光パターンを計測対象物に投射させる光投射ステップと、前記光投射ステップで光パターンが投射された計測対象物について撮影された画像を取り込む画像取込ステップと、前記画像取込ステップで取り込まれた画像に基づいて、前記複数の正弦波のそれぞれの位相を計算する位相計算ステップと、前記位相計算ステップで計算された各位相を、対応する正弦波の周期の長いものから順番により周期が長い正弦波の位相を参照しながら、接続していく位相接続ステップと、前記位相接続ステップで接続された位相と、前記光投射ステップで投射する光の発生位置及び前記画像撮影ステップでの撮影位置の位置関係と、前記画像取込ステップで取り込まれた画像中の各画素の位置とに基づいて、前記計測対象物の形状を求める形状算出ステップとを実行させるプログラムを記録することを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、3次元形状測定装置、方法及びこの方法を実行するためのプログラムを記録した記録媒体に関し、特に位相シフト法に基づく、位相の接続関係を容易に決定し、かつ従来より短い時間で実行可能な3次元形状の測定に関するものである。

【0002】

【従来の技術】非接触で対象物体の3次元構造を測定す

る手法はこれまで数多く提案されている。その中のひとつである位相シフト法に基づく3次元形状測定装置を、文献「縞走査を導入した格子パターン投影法（第2報）」、1992年7月、精密工学会誌、58-7、1173～1178頁（以下、文献1という）に基づいて説明する。本文献に記載の3次元形状測定装置は、外観的には後述する本発明の第1の実施の形態で用いられるものと実質的に同一である。

【0003】パターン投射器1は、輝度値が空間的に正弦波変調された光パターンを測定対象物体2へと投射する。パターン投射器1は、光源11、位相格子12、格子駆動装置13から構成されており、位相格子12には軸x方向に沿って正弦波状に光の透過率が変わるように、正弦波濃淡パターンを描画したフィルムが用いられている。

【0004】位相格子12は、格子駆動装置13によって軸x方向に駆動できるようになっており、計測対象物体2へ投射する光パターンをずらすことができる。物体表面上の点Pに着目すると、パターン投射器1から点Pへ投射される光強度 $E_p(t)$ は、数式5で表すことができる。

【0005】

【数5】

$$E_p(t) = A(1 + \cos(t + \phi))$$

【0006】ここで、Aは光パターン投射器1から点Pへ投射される光強度の最大値の1/2の値、 ϕ は位相格子12が初期位置にある時に、光源11と点Pを結ぶ直線と位相格子12の交点を持つ位相値、tは格子駆動装置13によって格子をずらした移動量を位相で表したものである。したがって、点Pをカメラ3で撮影した時に得られる画像の輝度 $I_p(t)$ は、数式6で表すことができる。

【0007】

【数6】

$$I_p(t) = I_p^{\text{bias}} + A' \cos(t + \phi)$$

【0008】ここで、 I_p^{bias} はバイアス項、A'は画像上での正弦波パターンの輝度振幅である。

【0009】コンピュータ4によって、格子駆動装置13を制御し適当な位相分ずつ駆動しながらその度毎にカメラ3によって撮影される画像を取り込むことにより、1周期分の画像系列を撮影する。例えば、文献1に記載されている例では、格子駆動装置13を1/4周期ずつ駆動し、 $t = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ での4枚の画像系列を撮影する。すると、数式7によって本画像系列から各画素に対応する対象物体2上の測定点Pに投射される光パターンの位相 ϕ を求めることができる。

【0010】

【数7】

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_p(\frac{3}{2}\pi) - I_p(\frac{1}{2}\pi)}{I_p(0) - I_p(\pi)}$$

【0011】しかし、数式7の計算では、 \tan^{-1} が周期 2π の周期関数であるために位相 ϕ は周期の整数倍の不定性を残してしか求められない。これは、位相が周期の整数倍だけ異なる位置に対応する点に投射される光パターンは全て同じになることと対応している。

【0012】また、文献「縞走査を導入した格子パターン投影法」、1989年10月、精密工学会誌、55-10、1817~1822頁（以下、文献2という）には、この周期の整数倍の不定性を除くために、次のようにして位相接続を行う方法が記載されている。

【0013】まず、全ての点について数式7の計算により $-\pi$ から π の範囲で位相 ϕ を計算する。次に、基準となる点を決定し、その点の位相をゼロとし、隣り合う画素間で位相が 2π の80%程度変化したときに 2π を加減算することで、周囲の点の位相を順次計算していく。そして、 ϕ が求めれば、パターン投射器1からの点Pの見込み角を求めることができ、また、点Pの画像の座標（ x 、 y ）からカメラ3からの見込み角も求められるので、三角測量の原理によって点Pの3次元座標を計算することができる。

【0014】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来例による3次元形状の計測によっては、単一の測定データにおいては、位相の接続がうまくできない場合があった。すなわち、物体形状の奥行き方向の変化が大きい部分や不連続がある部分で位相の接続に失敗し、正しい3次元形状データが求まらない場合が生ずるという問題点があった。

【0015】例えば、図3の（*）の部分のように、対象物体の形状が奥行き方向に急激に変化している部分があると、隣り合う画素間で位相が急激に変化し、図3（b）の（*）のように2つのピークがつながって測定されてしまう。このような場合、本来ここで 2π を加算すべきであるのにそれがなされず正しい位相が求まらなくなる。

【0016】このような場合には、より長い周期のパターンを投影し、図3（c）のように大局的な構造を得ておきそれを参照することで解決できる。図3の例では（c）は2倍の周期での位相であるので（b）に比べて位相の変化量は $1/2$ になる。従って、（*）の部分での位相の変化も正しく測定することができる。長い周期のパターンを用いれば、それだけ大きい形状変化に対応できることになるが、長い周期の光パターンを用いて測定を行うと位相の測定精度は低下する。

【0017】図8に同じ光パターン強度差 ΔI に対応する基本周期での位相差 $\Delta\phi_1$ と2倍周期での位相差 $\Delta\phi_2$ を示す。測定される光パターン強度の差 ΔI に対する位相の差 $\Delta\phi$ はパターンの周期が長い程小さくなるため、それだけ分解能が低下することになる。図8の例では周期が2倍になると分解能が $1/2$ になることが分か

る。したがって、同じ測定精度を保つためには基本の周期の光パターンでの位相と長い周期の光パターンでの位相の両方を測定する必要がある。従って、測定精度を保ちつつ、位相接続を確実にを行うためには、もともとの周期の正弦波パターンと、より長い周期のパターンの両方について測定を行わなければならない。

【0018】これを行うためには、2つのパターンの位相格子を用意して取り換えるか、または、図9に示したように位相格子に複数のパターンを印刷しておき、2つのパターンを連続して投射したり（図9（a））、新たな駆動装置を付加する（図9（b））などの手段を用いてパターンを切替える方法が考えられる。しかし、これらの手法は測定時間が長くなることや、装置が複雑になるために精度の低下をまねくことなどの問題があった。

【0019】なお、文献1、文献2の他に、特開平9-21620号公報には、カラーカメラを用い、撮影した画像を処理して分離した色成分毎の毎の変形格子画像から物体の形状を測定する3次元形状測定方法が開示されている。この方法では、カラー液晶パネルに任意の色と強度をもつパターンを表示し、そのパターンに基づくパターン光をプロジェクタから投射し、カラーカメラで撮影されたカラー画像を色分離することが必要となっている。

【0020】すなわち、この3次元形状測定方法では、カラー液晶パネルを用いなければならないので、そのための装置を製造するのにコストがかかり、また、撮影されたカラー画像を色分離しなければならなかったため、画像の処理が複雑になるという問題点があった。

【0021】本発明の目的は、位相の接続関係を容易に決定することができ、しかも従来よりも短い測定時間しか要しない3次元形状測定装置、方法及び記憶媒体を提供することにある。

【0022】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するため、本発明の第1の観点にかかる3次元形状測定装置は、複数の正弦波を足し合わせた信号で、前記複数の正弦波がそれぞれ最も周期の短い正弦波の整数倍の周期を有する信号によって表される強度変化を有する光パターンを計測対象物に投射する光投射手段と、前記光投射手段からの光パターンが投射された計測対象物の画像を撮影する画像撮影手段と、前記画像撮影手段によって撮影された画像に基づいて、前記複数の正弦波のそれぞれの位相を計算する位相計算手段と、前記位相計算手段によって計算された各位相を、対応する正弦波の周期の長いものから順番により周期が長い正弦波の位相を参照しながら、接続していく位相接続手段と、前記位相接続手段によって接続された位相と、前記光投射手段及び前記画像撮影手段との位置関係と、前記画像撮影手段によって撮影された画像中の各画素の位置とに基づいて、前記計測対象物の形状を求める形状算出手段とを備えることを

特徴とする。

【0023】上記3次元形状測定装置では、複数の周波数の異なる正弦波を足し合わせた信号で表される強度変化を有する光パターンを計測対象物へ1回照射すれば、それぞれの周波数に対応する位相を求めることができる。このように、光パターンの照射回数が1回で済むので、3次元形状の測定を高速に行うことができる。

【0024】また、上記3次元形状測定装置では、位相の接続は、周期の長いものから順番により周期が長い正弦波の位相を参照しながら行っていくので、位相接続を

10

確実に行うことが可能となる。

【0025】上記3次元形状測定装置において、前記光投射手段は、たとえば、所定の輝度の光を発する光源と、前記複数の正弦波を重ね合わせた信号によって表される強度変化に対応する濃淡パターンを有する位相格子と、前記位相格子を駆動する駆動手段とを備え、前記駆動手段によって駆動される位相格子を介して前記光源からの光を前記計測対象物に投射するものとするこ

20

とすることができる。

【0026】このように光照射手段の構成として位相格子を含めた場合には、この3次元形状測定装置では、異なる濃淡パターンを有する位相格子を複数用意して、それを取り替えたり、特殊な駆動手段を用意したりする必要がない。

【0027】また、前記光投射手段は、所定の輝度の光を発する光源と、前記複数の正弦波を重ね合わせた信号によって表される強度変化に対応して光の透過率を変化させる光透過手段とを備え、前記光透過手段を介して前記光源からの光を前記計測対象物に投射するものとするこ

30

ともできる。

【0028】さらには、前記光投射手段は、前記複数の正弦波を重ね合わせた信号によって表される強度変化で発光する発光素子を備え、前記発光素子が発した光を前記計測対象物に投射するものとするこ

40

ともできる。

【0029】このように光投射手段の構成として、光源と光透過手段とを組み合わせたものや、発光素子を適用することによって、光パターンの強度変化を容易に制御することが可能となる。また、投射する光パターンが複雑なものとなる場合でも、格子の作成が困難になるといった問題を回避できる。

【0030】上記3次元形状測定装置において、前記光投射手段が投射する光パターンを構成する正弦波 ψ_i ($i=1, 2, \dots, n$) は、数式8によって表されるものとするこ

【数8】

$$\psi_i = A_i \left(1 + \cos \left(\frac{1}{k_i} t \right) \right)$$

(但し、 i は正弦波信号の番号であり1から n までをとり、周期の短い順に番号をつけて1が基本の周期で n が最長の周期の正弦波とする。 k_i は1または正の整数で

50

$k_1 = 1 < k_2 < \dots < k_n$ 。であり、 A_i はそれぞれの周期における光強度である。) この場合、前記計測対象物上の点 P における光強度 $E_P(t)$ は、数式9によって表すことができ、

【数9】

$$E_P(t) = \sum_{i=1}^n A_i \left(1 + \cos \left(\frac{1}{k_i} t + \phi_i \right) \right)$$

(但し、 ϕ_i は光源から点 P への見込み角に応じて定まる、 $t=0$ 時点での各周期の正弦波毎の位相である。) 前記画像取込手段によって前記画像撮影手段から取り込んだ画像の前記点 P に対応する画素の輝度 $I_P(t)$ は、数式10によって表すことができる。

【数10】

$$I_P(t) = I_P^{\text{bias}} + \sum_{i=1}^n A_i' \cos \left(\frac{1}{k_i} t + \phi_i \right)$$

(但し、 I_P^{bias} は輝度のバイアス項、 A_i' は各周期における輝度の振幅である。)

【0031】この場合、前記位相計算手段は、前記光パターンを構成する正弦波 ψ_i の位相 ϕ_i を、数式11によって計算するものとするこ

【数11】

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{-\sum_{j=1}^m I_P(t_j) \sin \frac{1}{k_i} t_j}{\sum_{j=1}^m I_P(t_j) \cos \frac{1}{k_i} t_j}$$

ただし、 $t_j = \frac{j-1}{m} k_i \pi$

【0032】上記3次元形状測定装置において、前記位相接続手段は、画像全体で隣接する画素間の位相が滑らかになるように 2π ラジアン

の整数倍を足し引きして、各位相を接続していくものとするこ

【0033】上記目的を達成するため、本発明の第2の観点にかかる3次元形状測定装置は、互いに直交する複数の周期関数を足し合わせた信号で表される強度変化を有する光パターンを計測対象物に投射する光投射手段と、前記光投射手段からの光パターンが投射された計測対象物の画像を撮影する画像撮影手段と、前記画像撮影手段によって撮影された画像に基づいて、前記複数の周期関数のそれぞれの位相を計算する位相計算手段と、前記位相計算手段によって計算された各位相を、対応する周期関数の周期の長いものから順番により周期が長い周期関数の位相を参照しながら、接続していく位相接続手段と、前記位相接続手段によって接続された位相と、前記光投射手段及び前記画像撮影手段との位置関係と、前記画像撮影手段によって撮影された画像中の各画素の位置とに基づいて、前記計測対象物の形状を求める形状算出手段とを備えることを特徴とする。

【0034】このように、本発明は、複数の正弦波を足し合わせた信号以外であっても、互いに直交する複数の

周期関数を足し合わせた信号で表される強度変化を有する光パターンでも、計測対象物への照射を 1 回行うだけで、当該計測対象物の 3 次元形状を測定することができる。

【0035】上記目的を達成するため、本発明の第 3 の観点にかかる 3 次元形状測定装置は、複数の正弦波を足し合わせた信号で、前記複数の正弦波がそれぞれ最も周期の短い正弦波の整数倍の周期を有する信号によって表される強度変化を有する光パターンを計測対象物に投射する光投射ステップと、前記光投射ステップで光パターンが投射された計測対象物の画像を撮影する画像撮影ステップと、前記画像撮影ステップにおいて撮影された画像に基づいて、前記複数の正弦波のそれぞれの位相を計算する位相計算ステップと、前記位相計算ステップで計算された各位相を、対応する正弦波の周期の長いものから順番により周期が長い正弦波の位相を参照しながら、接続していく位相接続ステップと、前記位相接続ステップで接続された位相と、前記光投射ステップで投射する光の発生位置及び前記画像撮影ステップでの撮影位置の位置関係と、前記画像撮影ステップで撮影された画像中の各画素の位置とに基づいて、前記計測対象物の形状を求める形状算出ステップとを含むことを特徴とする。

【0036】上記目的を達成するため、本発明の第 4 の観点にかかるコンピュータ読み取り可能な記録媒体は、複数の正弦波を足し合わせた信号で、前記複数の正弦波がそれぞれ最も周期の短い正弦波の整数倍の周期を有する信号によって表される強度変化を有する光パターンを計測対象物に投射させる光投射ステップと、前記光投射ステップで光パターンが投射された計測対象物について撮影された画像を取り込む画像取込ステップと、前記画像取込ステップで取り込まれた画像に基づいて、前記複数の正弦波のそれぞれの位相を計算する位相計算ステップと、前記位相計算ステップで計算された各位相を、対応する正弦波の周期の長いものから順番により周期が長い正弦波の位相を参照しながら、接続していく位相接続ステップと、前記位相接続ステップで接続された位相と、前記光投射ステップで投射する光の発生位置及び前記画像撮影ステップでの撮影位置の位置関係と、前記画像取込ステップで取り込まれた画像中の各画素の位置とに基づいて、前記計測対象物の形状を求める形状算出ステップとを実行させるプログラムを記録することを特徴とする。

【0037】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して、本発明の実施の形態について説明する。

【0038】図 1 は、この実施の形態にかかる 3 次元形状測定装置の構成を示すブロック図であり、図 2 は、その外観構成図である。図 2 を参照すると、この 3 次元形状測定装置は、計測対象物 2 に対して光パターンを投射するパターン投射器 1 と、投射されたパターンの画像

を撮影するカメラ 3 と、画像の取り込みやパターン投射器 1 の制御および演算処理を行うコンピュータ 4 とを含む。なお、図 1 において、パターン投射器 1、計測対象物 2、カメラ 3 及び画像取込装置 4 は、2 つずつ示されているが、この実施の形態の機能を説明するためのものであり、物理的な構成としては、これらは 1 つずつで構成されている。

【0039】パターン投射器 1 は、光源 11 と、位相格子 12 と、位相格子駆動装置 13 とを備えている。

【0040】光源 11 は、対象物体に光パターンを投射するために十分な輝度の投射光を発する光源である。位相格子 12 は、格子駆動装置 13 によって駆動される方向の軸 x に沿っての光透過率分布が投射光パターンに対応するような濃淡パターンが印刷されている。この実施の形態では、図 4 に示すように、投射する光パターンは、基本の周期 π の正弦波信号 101 にその 2 倍の周期 2π の正弦波信号 102 を加えた信号 103 とする。したがって、カメラ 3 で撮影したとき画像上の画素 (x , y) の位置にうつる点にパターン投射器 1 から投射される光パターン $E(x, y, t)$ は、数式 12 で表される。

【0041】

【数 12】

$$E(x, y, t) = A_1(1 + \cos(t + \phi_1)) + A_2(1 + \cos(\frac{1}{2}t + \phi_2))$$

【0042】ここで、 A_1 が基本の周期の正弦波光パターンの光強度の最大値、 A_2 が 2 倍の周期の正弦波光パターンの光強度の最大値、 t は格子駆動装置 13 によって格子を動かした移動量を位相で表したものの、 ϕ_1 は基本の周期での位相、 ϕ_2 は 2 倍の周期での位相である。

【0043】格子駆動装置 13 は、コンピュータ 4 からの制御によって位相格子 12 を駆動し、必要なタイミングで投射する光パターンを変化させる。

【0044】カメラ 3 は、パターン投射器 1 から測定対象物 2 に投射された光パターンを撮影し、その撮影した画像をコンピュータ 4 に伝送する。

【0045】コンピュータ 4 は、パーソナルコンピュータやエンジニアリングワークステーションによって構成され、画像取り込み装置 41 と、位相計算処理部 42、43 と、位相接続処理部 54 と、距離演算処理部 55 と、測定制御処理部 56 を備える。

【0046】画像取り込み装置 41 は、カメラ 3 によって撮影された光パターンの画像を、測定制御処理 56 からの制御により適切なタイミングでコンピュータの記憶装置に取り込む。この実施例では、 $t_i = \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi, 5\pi/2, 3\pi, 7\pi/2\}$ の各時刻において合計 8 枚の画像 $I_i = I(x, y, t_i)$ を取り込む。すなわち、画像取込装置 41 は、格子駆動装置 13 の動きと合わせて適切なタイミングで画像を取り込むように制御される。

【0047】位相計算処理部42、43は、取り込んだ時系列画像から、画像上の各画素に対応する測定対象物体2上の点に投射される光パターンの位相を計算する。第1の位相計算処理部42は、基本の周期の正弦波に対する位相 ϕ_1 を数式13に従って計算する。また、第2の位相計算処理部43は、2倍の周期の正弦波に対する位相 ϕ_2 を数式14に従って計算する。

【0048】

【数13】

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{-\sum_{i=0}^T I_i \sin t_i}{\sum_{i=0}^T I_i \cos t_i}$$

【0049】

【数14】

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{-\sum_{i=0}^T I_i \sin \frac{1}{2} t_i}{\sum_{i=0}^T I_i \cos \frac{1}{2} t_i}$$

【0050】上記の数式13、数式14からそれぞれ求められる位相 ϕ_1 、 ϕ_2 の値には 2π の整数倍の不定性が残っている。位相接続処理部54は、この不定性を除くため、次に説明するような方法により位相の接続を行う。

【0051】位相接続処理部54は、まず、数式14で求めた位相 ϕ_2 を接続する。この場合、従来手法と同様に、まず位相接続の基準点のある1点に決め、そこから周囲の画素を次々に見ていき、隣り合う画素間で位相が 2π の80%以上変化した場合に 2π を足し引きする。

【0052】すでに従来例において、図3を参照して説明したように、この方法では隣り合う画素の間で大きな位相変化を起こすような対象物体の形状の変化や不連続があると接続ができなくなる。しかし、2倍の周期では十分周期が長いのでそのような問題は起きずに接続が行える。

【0053】位相接続処理部54は、次に、数式13で求めた位相 ϕ_1 を接続する。ここでは基本の周期が短いために上述の問題が発生するが、2倍の周期で測定した位相 ϕ_2 を参照することで解決できる。位相 ϕ_2 は位相 ϕ_1 に比べて同じ形状変化に対する変化量が $1/2$ であるので、処理している画素の周囲での ϕ_2 の変化を参照することで容易に位相接続が行える。

【0054】例えば、図3の場合では、 ϕ_1 （図の(b)）を見ただけでは(*)の部分で位相が大きく変化していることが検出できず誤った接続を行ってしまうが、 ϕ_2 の接続された値を参照することで位相の変化が大きいことが検出でき、正しい接続を行うことができる。

【0055】距離演算処理部55は、カメラ3と光源11の位置関係と、各画素の接続された位相値を用いて計測対象物体2の表面までの奥行きを計算する。画素の座標(x, y)および位相接続処理部54によって求めた

位相値 ϕ を用いて、従来例で説明した文献「縞走査を導入した格子パターン投影法」に記載の手法により、測定対象物体2の表面の3次元座標を計算する。

【0056】測定制御処理部56は、格子駆動装置13と画像入力装置41とを同期して駆動し、適切なタイミングでパターン投射器1からのパターンの投影とカメラ3による画像の取り込みとが行えるようにする。

【0057】以下、この実施の形態にかかる3次元形状測定装置の動作について、説明する。コンピュータ4の測定制御処理部56は、格子駆動装置13を駆動制御して、パターン投射器1から信号103と同様の強度変化を有する光パターンを計測対象物体2に投射させる。計測対象物体2に投射された光パターンによる画像は、カメラ3によって撮影される。このとき、画像の画素(x, y)に位置での光パターンE(x, y, t)は、上記したように数式12で表される。

【0058】測定制御部56は、また、格子駆動装置13の駆動に同期して、画像取込装置41を制御し、カメラ3で撮影された画像を、 $t_i = \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi, 5\pi/2, 3\pi, 7\pi/2\}$ の各時刻において合計8枚の時系列画像 $I_i = I(x, y, t_i)$ を取り込んでいく。

【0059】このように時系列画像が画像取込装置41に取り込まれると、上記で説明したような方法により、第1位相計算処理部42は位相 ϕ_1 を、第2位相計算処理部43は位相 ϕ_2 を、それぞれ計算する。

【0060】次に、位相接続処理部54で位相の接続が行われるが、位相接続処理部54は、まず、位相接続の基準点のある1点に決め、そこから周囲の画素を次々に見ていき、隣り合う画素間で位相が 2π の80%以上変化した場合に 2π を足し引きすることによって、位相 ϕ_2 を接続する。さらに、位相接続処理部54は、位相 ϕ_1 の2倍の周期で測定した位相 ϕ_2 を参照することによって、さらに位相 ϕ_1 を接続する。

【0061】そして、距離演算処理部55において、カメラ3と光源11の位置関係と、各画素の接続された位相値に基づいて計測対象物体2の表面までの奥行きが計算され、画素の座標(x, y)および位相接続処理部54によって求めた位相値 ϕ_1 を用いて、測定対象物体2の表面の3次元座標が計算される。

【0062】以上説明したように、この実施の形態の3次元形状測定装置では、パターン投射器1から計測対象物体2に投射する光パターンを、基本周期の正弦波とその2倍周期の正弦波とを足し合わせた強度変化を有するものとしている。そして、カメラ3で撮影した画像のうち、それぞれの周期の正弦波成分から位相 ϕ_1 と ϕ_2 とが計算される。このため、計測対象物体2の3次元形状の測定のために、光パターンの照射を1回だけで行えるので、3次元形状の測定に必要となる時間を従来に比べて大きく短縮することができる。

【0063】また、位相接続処理部44において、基本周期の正弦波成分に対応する位相 ϕ 、を接続する場合に、その2倍の周期の正弦波成分に対応する位相 ϕ 、を参照しているため、位相接続を確実に行うことが可能となる。

【0064】さらには、この実施の形態の3次元形状測定装置では、位相格子12は1つだけ用意すればよいので、異なる濃淡パターンを有する位相格子を複数用意して、それを取り替えたり、特殊な駆動手段を用意したりする必要がない。

【0065】この実施の形態では、基本の周期と2倍の周期で測定を行っているが、さらに長い周期での測定が必要であれば3倍、4倍、…の周期の光パターンを用いることもできる。また、測定回数(画像の取り込み回数)を8回としているが、この測定回数は変えることもできる。例えば、測定回数を増やせばそれだけ位相の計算精度が向上することが期待される。また、参照用に2倍の周期の光パターンを用いているが、さらに長い周期の光パターンを用いればより大きな形状変化にも対応できることになる。また、正弦波以外の直交関数系による周期関数を用いることもできる。

【0066】さらには、この実施の形態において、コンピュータ4の各機能を実現し、上記処理の各手順を実行するためのプログラムは、CD-ROMなどのコンピュータ読み取り可能な記録媒体に格納して配布してもよい。

【0067】[第2の実施の形態]図5は、この実施の形態にかかる3次元形状測定装置の外観構成を示す。図示するように、この実施の形態の3次元形状測定装置は、図2の位相格子12を液晶格子14に置き換えている。また、液晶格子14を用いたことで、図2の格子駆動装置13が必要なくなる点で、第1の実施の形態の3次元形状測定装置と異なっている。また、コンピュータ4の構成は、図1に示す第1の実施の形態のものとはほぼ同様であるが、測定制御装置56は、画像入力装置41に同期して液晶格子14を駆動制御する。

【0068】この実施の形態にかかる3次元形状測定装置は、測定制御処理部56は、画像入力装置41に同期して液晶格子14を駆動して、光源11からの光の透過率を変化させることによって、第1の実施の形態で撮影した印刷されている濃淡パターンと同様のパターンが発生させる点を除けば、第1の実施の形態の場合と同様にして動作させることができる。

【0069】以上説明したように、この実施の形態の3次元形状測定装置では、液晶格子14を用いているので、格子駆動装置13によって格子を駆動する必要がなく、パターンの変化をより正確に制御することができる。また、液晶格子14では、格子の生成を容易に行うことができるので、投射パターンを複雑なものとした場合に、格子の作成が困難になるといった問題を回避する

ことができる。

【0070】なお、この実施の形態においても、コンピュータ4の各機能を実現し、上記処理の各手順を実行するためのプログラムは、CD-ROMなどのコンピュータ読み取り可能な記録媒体に格納して配布してもよい。

【0071】[第3の実施の形態]図6は、この実施の形態にかかる3次元形状測定装置の外観構成を示す。図示するように、この実施の形態の3次元形状測定装置は、図2のパターン投射器1は、光源11と位相格子12の代わりに、自発光素子であるプラズマ・ディスプレイ・パネル(PDP)15を備える。また、PDP15を用いたことで、図2の格子駆動装置13が必要なくなる点で、第1の実施の形態の3次元形状測定装置と異なっている。また、コンピュータ4の構成は、図1に示す第1の実施の形態のものとはほぼ同様であるが、測定制御装置56は、画像入力装置41に同期してPDP15を駆動制御する。

【0072】この実施の形態にかかる3次元形状測定装置は、測定制御処理部56は、画像入力装置41に同期してPDP15を駆動制御して、PDP15が発生する光のパターンを変化させることによって、第1の実施の形態で撮影した印刷されている濃淡パターンと同様のパターンが発生させる点を除けば、第1の実施の形態の場合と同様にして動作させることができる。

【0073】以上説明したように、この実施の形態の3次元形状測定装置においても、PDP15を用いているので、格子駆動装置13によって格子を駆動する必要がなく、パターンの変化をより正確に制御することができる。また、PDP15では、所望の光パターンを容易に発生させることができるので、投射パターンを複雑なものとした場合に、格子の作成が困難になるといった問題を回避することができる。

【0074】なお、この実施の形態においても、コンピュータ4の各機能を実現し、上記処理の各手順を実行するためのプログラムは、CD-ROMなどのコンピュータ読み取り可能な記録媒体に格納して配布してもよい。

【0075】[第4の実施の形態]上記第1～第3の実施の形態では、2つの周期の正弦波を足し合わせた光パターンを用いた場合について説明したが、この実施の形態では、任意の数 n の正弦波を足し合わせた光パターンを用いて3次元形状を測定する場合について、説明する。

【0076】図7は、この実施の形態にかかる3次元形状測定装置の構成を示すブロック図である。図示するように、この実施の形態にかかる3次元形状測定装置は、第1の実施の形態のもの(図1)とはほぼ同様であるが、パターン投射器1から投射される光パターンのそれぞれの正弦波信号成分は、数式15で表される。

【0077】

【数15】

$$\psi_i = A_i \left(1 + \cos \left(\frac{1}{k_i} t \right) \right)$$

【0078】ここで、 i は正弦波信号の番号であり1から n までをとり、周期の短い順に番号をつけて1が基本の周期で n を最長の周期の正弦波とする。 k_i は1または正の整数で $k_1 = 1 < k_2 < \dots < k_n$ であり、 A_i はそれぞれの周期における光強度であるとする。即ち ψ_i は基本の周期の k_i 倍の周期の正弦波であり、 k^* を k_1, k_2, \dots, k_n の最小公倍数とすれば、 $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ は区間 $t = [0, 2k^*\pi]$ で直交している。

【0079】従って、パターン投射器1から物体上の点Pへ投射される光強度 $E_p(t)$ は、数式16で表すものとなる。

【0080】

【数16】

$$E_p(t) = \sum_{i=1}^n A_i \left(1 + \cos \left(\frac{1}{k_i} t + \phi_i \right) \right)$$

【0081】ここで、 ϕ_i は光源から点Pへの見込み角に応じて定まる、 $t=0$ 時点での各周期の正弦波毎の位相である。

【0082】また、コンピュータ4において、画像取込装置41は、カメラ3によって撮影された画像を取り込むが、画像取込装置41が取り込んだ画像の点Pにおける輝度 $I_p(t)$ は、数式17で表される。

【0083】

【数17】

$$I_p(t) = I_p^{\text{bias}} + \sum_{i=1}^n A_i' \cos \left(\frac{1}{k_i} t + \phi_i \right)$$

【0084】ここで、 I_p^{bias} は輝度のバイアス項、 A_i' は各周期における輝度の振幅を表している。

【0085】コンピュータ4内には、光パターンとして足し合わされる正弦波が n 個であることに対応して、 n 個の位相計算処理部41～4nが設けられている。位相計算処理部41～4nでは、光パターンを $t=0$ から $2k^*\pi$ まで均等に m ステップ、 t_1 から t_m まで変化させながら画像 $I_p(t)$ を観測するとすると、各周期の正弦波は互いに直交しているためにそれぞれの位相 ϕ_i は、数式18により求められる。

【0086】

【数18】

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{-\sum_{j=1}^m I_p(t_j) \sin \frac{1}{k_i} t_j}{\sum_{j=1}^m I_p(t_j) \cos \frac{1}{k_i} t_j}$$

ただし、 $t_j = \frac{j-1}{m} k^* \pi$

【0087】位相接続処理部54は、画像全体で隣接する画素間の位相が滑らかになるように 2π の整数倍を足

し引きして、位相 ϕ 。から順番に位相 ϕ_i の接続を行っていくが、このとき、より周期の長い正弦波で測定した位相 ϕ_j ($j=i \sim n$)を参照する。

【0088】ここで、最も長い周期を図3に示したような位相接続の問題が起こらないような十分長い周期にしておけば、 ϕ 。の位相接続は従来例で説明した文献「縞走査を導入した格子パターン投影法」に記載の手法と同様の手法で行うことができる。こうして長い周期での接続された位相 ϕ 。を得ておけば、短い周期での位相の位相接続において、図3に示したような問題が起こった場合にも、より長い周期での位相を参照することで正しく位相接続を行うことができる。

【0089】以上、この実施の形態で示したように、任意の個数 n の異なる周期の正弦波信号成分を有する光パターンを計測対象物体2に1回だけ投射するだけで、各正弦波成分に対応する位相を同時に測定することができる。これにより、位相格子12に複数のパターンを用意して、測定を繰り返す必要がなくなる。あるいは、液晶格子14またはPDP15の駆動制御を繰り返す必要がなくなる。さらに、より長い周期の正弦波成分での位相を参照することで、位相接続を確実に行うことができる。

【0090】なお、この場合においても、正弦波以外の直交関数系による周期関数を用いる。さらには、この実施の形態においても、コンピュータ4の各機能を実現し、上記処理の各手順を実行するためのプログラムは、CD-ROMなどのコンピュータ読み取り可能な記録媒体に格納して配布してもよい。こともできる。

【0091】

【発明の効果】本発明を用いれば、異なる周期での位相の測定を同時に行うことができ、位相接続を確実に行うことができるとともに、それぞれの周期で測定を繰り返す従来の手法に比べて必要な測定時間を短縮できるという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態にかかる3次元形状測定装置のブロック図である。

【図2】本発明の第1の実施の形態にかかる3次元形状測定装置の構成を示す図である。

【図3】位相の接続のための手法を説明する図である。

【図4】パターン投射器から投射する光パターンを説明するための図である。

【図5】本発明の第2の実施の形態にかかる3次元画像計測装置の構成を示す図である。

【図6】本発明の第3の実施の形態にかかる3次元画像計測装置の構成を示す図である。

【図7】本発明の第4の実施の形態にかかる3次元画像計測装置のブロック図である。

【図8】従来技術において、測定に用いる正弦波の周期と測定精度の関係を説明する図である。

【図9】従来技術によって異なる周期での測定を行うために用いる位相格子を説明する図である。

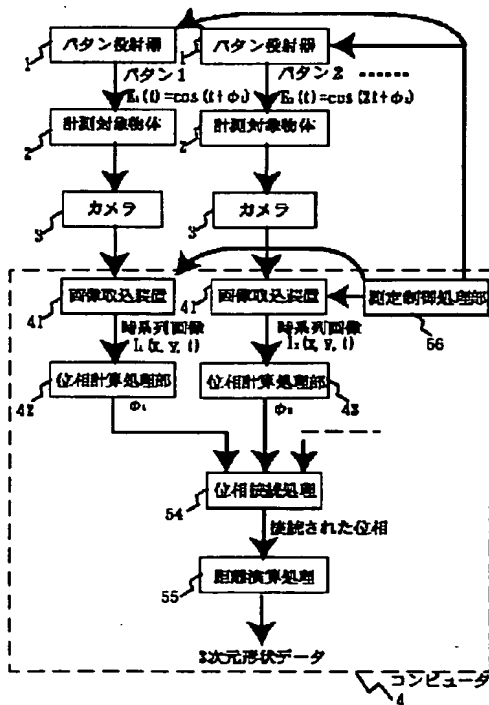
【符号の説明】

- 1 パターン投射器
- 2 測定対象物体
- 3 カメラ
- 4 コンピュータ
- 11 光源
- 12 位相格子
- 13 位相格子駆動装置

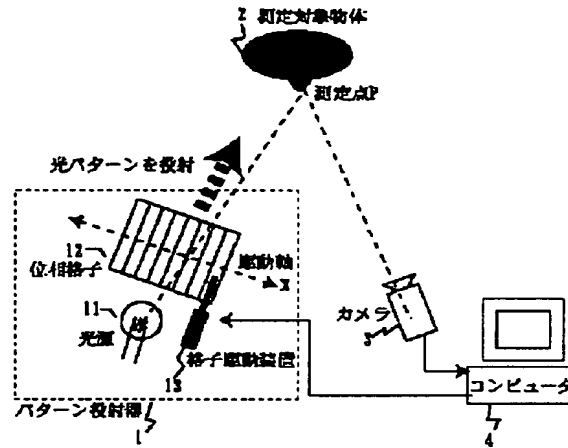
- *14 液晶格子
- 15 プラズマ・ディスプレイ・パネル (PDP)
- 41 画像取込装置
- 42 位相計算処理部
- 43 位相計算処理部
- 4n 位相計算処理部
- 54 位相接続処理部
- 55 距離演算処理部
- 56 測定制御処理部

*10

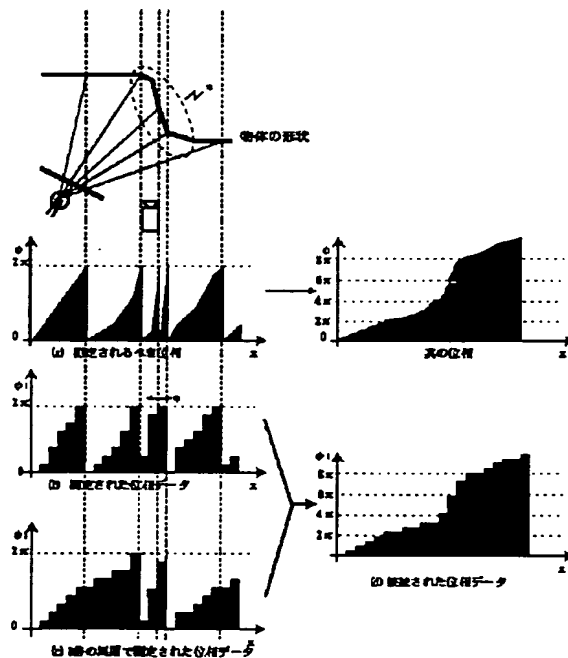
【図1】



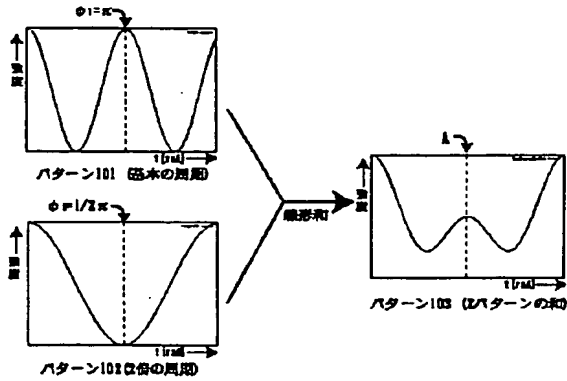
【図2】



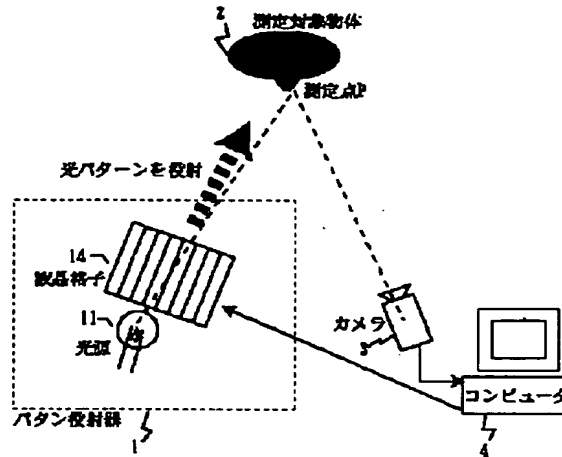
【図3】



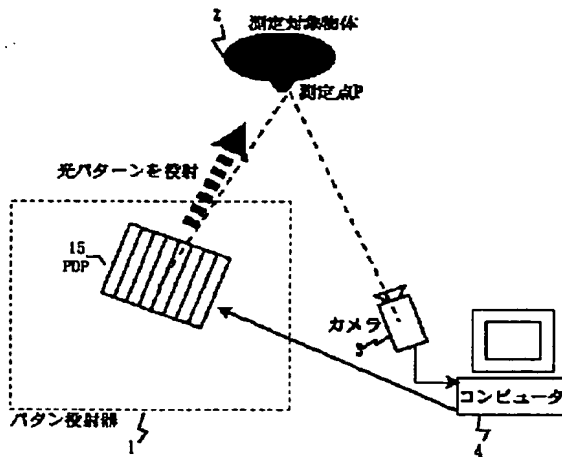
【図4】



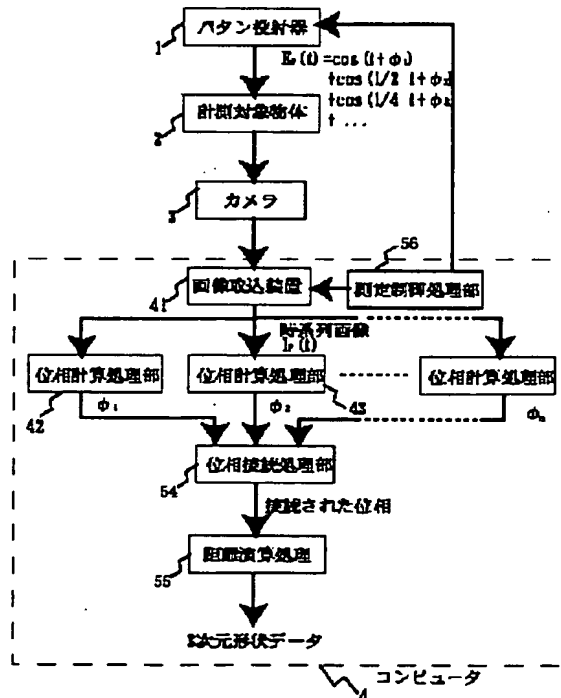
【図5】



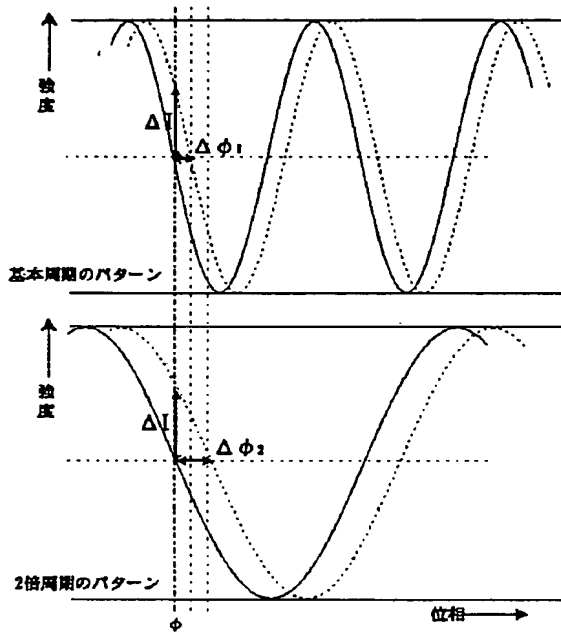
【図6】



【図7】



【図8】



【図9】

